



# اصول ترمودینامیک

(مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون)

دکتر سید جعفر هاشمی

## بسم الله الرحمن الرحيم

### پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک‌درسی چاپ می‌شوند.

**کتاب درسی** ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

**متن آزمایشگاهی (م)** راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

**کتاب‌های فرادرسی (ف) و کمک‌درسی (ک)** به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید محتوا و تجهیزات آموزشی



## فهرست مطالب

| نه | پیشگفتار نویسنده                          |
|----|-------------------------------------------|
| ۱  | فصل اول                                   |
| ۱  | اهداف                                     |
| ۱  | مقدمه                                     |
| ۲  | ۱-۱ تعاریف واژه‌های متداول ترمودینامیکی   |
| ۳  | ۱-۱-۱ نظریه ماکروسکوپی در ترمودینامیک     |
| ۳  | ۲-۱-۱ سیستم ترمودینامیکی                  |
| ۵  | ۳-۱-۱ سیستم مرز بسته                      |
| ۵  | ۴-۱-۱ سیستم مرز باز                       |
| ۵  | ۵-۱-۱ سیستم ایزوله (عایق حرارتی)          |
| ۵  | ۶-۱-۱ حالت ترمودینامیکی                   |
| ۵  | ۷-۱-۱ تعادل ترمودینامیکی                  |
| ۶  | ۸-۱-۱ فرآیند (تحول) ترمودینامیکی          |
| ۷  | ۹-۱-۱ سیکل در فرآیندهای ترمودینامیکی      |
| ۸  | ۱۰-۱-۱ خواص و حالت یک ماده                |
| ۸  | ۲-۱ دما و معیارهای دمایی در ترمودینامیک   |
| ۹  | ۱-۲-۱ تعادل دمایی                         |
| ۹  | ۲-۲-۱ معیار سلسیوس ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
| ۱۰ | ۳-۲-۱ معیار کلونین (K)                    |
| ۱۰ | ۴-۲-۱ معیار فارنهایت (F)                  |
| ۱۰ | ۵-۲-۱ تبدیل واحدهای دمایی                 |
| ۱۲ | ۳-۱ آحاد جرم، طول، زمان، نیرو             |
| ۱۲ | ۱-۳-۱ انرژی                               |
| ۱۳ | ۲-۳-۱ حجم مخصوص                           |
| ۱۳ | ۳-۳-۱ فشار                                |

|    |                                                      |
|----|------------------------------------------------------|
| ۱۴ | ۴-۱ گرما                                             |
| ۱۶ | ۱-۴-۱ انتقال گرما                                    |
| ۱۷ | ۲-۴-۱ گرمای نهان (Latent heat)                       |
| ۱۸ | ۳-۴-۱ گرمای نهان تبخیر (Latent heat of vaporization) |
| ۱۹ | ۴-۴-۱ گرمای نهان ذوب                                 |
| ۲۰ | ۵-۴-۱ گرمای نهان ویژه میعان                          |
| ۲۱ | ۵-۱ مسائل فصل اول                                    |
| ۲۳ | ۶-۱ پاسخ مسائل فصل اول                               |
| ۲۵ | <b>فصل دوم</b>                                       |
| ۲۵ | اهداف                                                |
| ۲۵ | ماده خالص و ویژگی های آن                             |
| ۲۶ | ۱-۲ فازها                                            |
| ۲۸ | ۲-۲ تعادل در فازها                                   |
| ۳۲ | ۳-۲ کیفیت بخار در ناحیه دو فازی                      |
| ۳۳ | ۴-۲ حجم مخصوص در ناحیه دوفازی                        |
| ۳۸ | ۵-۲ نقطه سه گانه                                     |
| ۴۰ | ۶-۲ تبدیل آلوتروپیک                                  |
| ۴۱ | ۷-۲ مسائل فصل دوم                                    |
| ۴۳ | ۸-۲ پاسخ مسائل فصل دوم                               |
| ۴۵ | <b>فصل سوم</b>                                       |
| ۴۵ | اهداف                                                |
| ۴۵ | ۱-۳ معادلات گاز ایده آل                              |
| ۴۹ | ۲-۳ تفاوت گاز ایده آل و گاز حقیقی                    |
| ۵۰ | ۳-۳ قانون دالتون                                     |
| ۵۱ | ۴-۳ قانون بویل - چارلز                               |
| ۵۱ | ۵-۳ معادله حالت برای فاز بخار یک ماده تراکم پذیر     |
| ۵۲ | ۳-۶ شرایط متعارفی                                    |
| ۵۳ | ۷-۳ تراکم پذیری                                      |
| ۵۴ | ۳-۸ مسائل فصل سوم                                    |
| ۵۶ | ۳-۹ پاسخ مسائل فصل سوم                               |
| ۵۷ | <b>فصل چهارم</b>                                     |
| ۵۷ | اهداف                                                |
| ۵۷ | ۱-۴ کار در فرآیندهای ترمودینامیکی                    |
| ۶۲ | ۲-۴ فرآیندهای خاص ترمودینامیکی                       |
| ۶۶ | ۳-۴ انرژی گرمایی                                     |
| ۶۸ | ۴-۴ روش های انتقال گرما                              |
| ۶۸ | ۱-۴-۴ روش هدایت (Conduction)                         |
| ۷۱ | ۲-۴-۴ روش جابه جایی (Convection)                     |
| ۷۲ | ۳-۴-۴ تشعشع یا تابش (Radation)                       |

|     |                                                  |
|-----|--------------------------------------------------|
| ۷۴  | ۵-۴ مقایسه گرما (Q) و کار (W)                    |
| ۷۵  | ۶-۴ محاسبه کار در فشار و حجم متغیر               |
| ۷۶  | ۷-۴ مسائل فصل چهارم                              |
| ۷۷  | ۷-۴ پاسخ مسائل فصل چهارم                         |
| ۷۹  | <b>فصل پنجم</b>                                  |
| ۷۹  | اهداف                                            |
| ۷۹  | مقدمه                                            |
| ۸۱  | ۱-۵ قانون اول ترمودینامیک برای سیستم بسته        |
| ۸۲  | ۲-۵ کار و حرارت در سیستم جرم کنترل               |
| ۸۸  | ۳-۵ قانون اول ترمودینامیک و فرایندهای خاص        |
| ۸۸  | ۱-۳-۵ قانون اول و فرآیند هم حجم (Iso- volume)    |
| ۸۹  | ۲-۳-۵ قانون اول و فرآیند هم دما (Isotherm)       |
| ۹۱  | ۳-۳-۵ قانون اول و فرآیند هم فشار (Iso-bar)       |
| ۹۳  | ۴-۳-۵ قانون اول و فرآیند بی دررو (Adiabatic)     |
| ۹۴  | ۵-۳-۵ قانون اول و فرآیند پلی تروپیک              |
| ۹۶  | ۴-۵ آنتالپی سیستم و مفهوم آن                     |
| ۱۰۰ | ۵-۵ گرمای نهان                                   |
| ۱۰۲ | ۶-۵ ظرفیت گرمایی ویژه                            |
| ۱۰۴ | چند نکته از ظرفیت گرمایی ویژه                    |
| ۱۰۶ | ۷-۵ ضریب اتمیسته                                 |
| ۱۰۸ | ۸-۵ قانون اول به صورت معادله آهنگی               |
| ۱۰۸ | ۹-۵ مسائل فصل پنجم                               |
| ۱۱۰ | ۱۰-۵ پاسخ مسائل فصل پنجم                         |
| ۱۱۳ | <b>فصل ششم</b>                                   |
| ۱۱۳ | اهداف                                            |
| ۱۱۳ | ۱-۶ قانون اول ترمودینامیک در حجم کنترل           |
| ۱۱۷ | ۲-۶ حالات در فرآیند حجم کنترل                    |
| ۱۱۷ | ۱-۲-۶ فرآیند حالت پایدار- جریان پایدار (SSSF)    |
| ۱۲۳ | ۲-۲-۶ فرآیند حالت یکنواخت - جریان یکنواخت (USUF) |
| ۱۲۴ | ۳-۶ تبادل گرما و قانون اول ترمودینامیک           |
| ۱۲۶ | ۴-۶ مسائل فصل ششم                                |
| ۱۲۸ | ۵-۶ پاسخ مسائل فصل ششم                           |
| ۱۲۹ | <b>فصل هفتم</b>                                  |
| ۱۲۹ | اهداف                                            |
| ۱۳۰ | ۱-۷ بیان کلوین- پلانک                            |
| ۱۳۲ | ۲-۷ بیان کلاسیوس                                 |
| ۱۳۴ | ۳-۷ فرآیند برگشت پذیر                            |
| ۱۳۵ | ۱-۳-۷ عوامل برگشت ناپذیری                        |
| ۱۳۷ | ۴-۷ آنتروپی                                      |

|     |                                                                  |
|-----|------------------------------------------------------------------|
| ۱۴۱ | ۱-۴-۷ تغییر آنتروپی در فرایندهای بازگشت پذیر                     |
| ۱۴۲ | ۲-۴-۷ فرایند بازگشت پذیر و ارتباط آنتالپی، آنتروپی و انرژی داخلی |
| ۱۴۳ | ۳-۷-۷ تغییر آنتروپی در جامدات و مایعات                           |
| ۱۴۴ | ۴-۴-۷ آنتروپی در فرایند پلی تروپیک                               |
| ۱۴۴ | ۵-۴-۷ تغییر آنتروپی در فرایند بازگشت ناپذیر                      |
| ۱۴۵ | ۶-۴-۷ تغییر آنتروپی سیستم و محیط                                 |
| ۱۴۶ | ۵-۷ مسائل فصل هفتم                                               |
| ۱۴۷ | ۶-۷ پاسخ مسائل فصل هفتم                                          |
| ۱۴۹ | <b>فصل هشتم</b>                                                  |
| ۱۴۹ | اهداف                                                            |
| ۱۴۹ | مقدمه                                                            |
| ۱۵۰ | ۱-۸ سیکل موتور حرارتی                                            |
| ۱۵۹ | ۱-۱-۸ سیکل کارنو                                                 |
| ۱۶۱ | ۴-۱-۸ سیکل اتو                                                   |
| ۱۶۳ | ۵-۱-۸ سیکل دیزل                                                  |
| ۱۶۵ | ۲-۸ سیکل تبرید تراکمی                                            |
| ۱۶۹ | ۳-۸ مسائل فصل هشتم                                               |
| ۱۷۰ | ۴-۸ پاسخ مسائل فصل هشتم                                          |
| ۱۷۱ | <b>فصل نهم</b>                                                   |
| ۱۷۱ | اهداف                                                            |
| ۱۷۱ | مقدمه                                                            |
| ۱۷۱ | ۱-۹ مخلوط گازهای ایده آل                                         |
| ۱۷۲ | ۱-۱-۹ جزء مولی                                                   |
| ۱۷۲ | ۲-۱-۹ جزء جرمی                                                   |
| ۱۷۳ | ۳-۱-۹ انرژی داخلی مخلوط                                          |
| ۱۷۳ | ۴-۱-۹ آنتالپی مخلوط                                              |
| ۱۷۳ | ۵-۱-۹ آنتروپی مخلوط                                              |
| ۱۷۴ | ۶-۱-۹ ظرفیت های گرمایی مخلوط                                     |
| ۱۷۵ | ۲-۹ مدل های اختلاط                                               |
| ۱۷۵ | ۱-۲-۹ قانون دالتون                                               |
| ۱۷۶ | ۲-۲-۹ قانون آماگات                                               |
| ۱۷۷ | ۳-۹ قانون اول برای مخلوط گاز و بخار                              |
| ۱۷۹ | ۴-۹ مسائل فصل نهم                                                |
| ۱۷۹ | ۵-۹ پاسخ مسائل فصل نهم                                           |
| ۱۸۱ | <b>منابع</b>                                                     |
| ۱۸۳ | <b>جداول ترمودینامیکی</b>                                        |

### پیشگفتار نویسنده

یکی از پارامترهای مهم در علوم مهندسی آشنایی با اصول ترمودینامیک، درک مفاهیم اصلی و استفاده مؤثر از آن در موضوعاتی نظیر مکانیک سیالات و انتقال حرارت و همچنین دیگر کاربردهای مهندسی می‌باشد. تجهیزاتی نظیر تأسیسات نیروگاه‌های بخار، پیل‌های سوختی، یخچال‌ها و سیستم‌های تراکمی، سردکننده‌های ترموالکتریک، موتورهای راکت و تأسیسات جداسازی هوا نیاز به آگاهی ما از مفاهیم و قوانین ترمودینامیک دارد.

با توجه به اینکه کتاب فوق برای دانشجویان رشته ماشین‌آلات تدوین شد لازم است نگاهی اجمالی به کاربرد عملی این درس بپردازیم. در بخش کشاورزی ما با دو نوع ماشین در ارتباط هستیم که عبارتند از ماشین‌های مزرعه‌ای (دینامیکی) و ماشین‌های ثابت زراعی (استاتیکی) می‌باشند. در راستای پیشرفت صنعت، برای جبران عقب ماندگی و بهره‌وری بهتر نیاز به دانش اولیه ترمودینامیک در تحلیل و طراحی ماشین‌های کشاورزی در مزرعه می‌باشیم که با کمک مهندسين مکانیک قابل اجرا است. صنایع وابسته به کشاورزی از حساس‌ترین بخش‌ها در جهت توسعه کشاورزی و افزایش درآمد از طریق حفظ کیفیت مواد غذایی و جلوگیری از افزایش ضایعات به جهت پاسخگویی به نیاز روزافزون جمعیت می‌باشد. شناخت از گرما و انرژی حرارتی و همچنین چگونگی افزایش آنتالپی هوا جهت کاهش رطوبت محصولات کشاورزی با حداقل خسارت، نیاز به آگاهی متخصصین این صنعت به اصول اولیه ترمودینامیک



می‌باشد. در نهایت تلاش شد که دانشجو با یادگیری این کتاب یک تصویر کلی از اصول و مبانی ترمودینامیک به‌دست آورد. و همزمان بتواند مبانی فوق را در حل و تحلیل مسائل کاربردی به‌کار گیرد و خدا را بر این توفیق سپاسگزارم.

سید جعفر هاشمی  
استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

# فصل اول

## ترمودینامیک و مفاهیم اولیه

### اهداف

در پایان فصل، دانشجو با مفاهیم زیر آشنا می‌شود:

۱. آشنایی با واژه‌های ترمودینامیکی
۲. آشنایی با معیارهای دمای و معادلات تبدیل
۳. گرما و ویژگی‌های آن در مواد

### مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در ترمودینامیک درک مفاهیم اصلی و کاربرد آن در موضوعاتی نظیر مکانیک سیالات، انتقال حرارت و ترمودینامیک آماری و همچنین استفاده مؤثر از ترمودینامیک در کاربردهای مهندسی می‌باشد. در این میان انتقال حرارت و تغییرات دما حائز اهمیت فراوان است. دمای یک سیستم ویژگی است که تعیین می‌کند آیا یک سیستم با سیستم‌های دیگر در تعادل گرمایی قرار دارد یا خیر. مفاهیم داغ و سرد برای انسان، مانند هر موجود زنده دیگر ذاتی است و دمای محیط مجاور را بیلون‌ها عصبی که به سطح پوسته می‌رسند، به مغز خبر می‌دهند. اما پاسخ فیزیولوژیکی به دما اغلب همراه کننده است و کسی که چشمش بسته است نمی‌تواند بگوید که آیا دستش با اتوی بسیار داغ، سوخته یا به وسیله یک تکه یخ خشک شده است. همچنین گرما نوعی انرژی است که از اجسام گرم به اجسام سرد منتقل می‌شود. اهمیت آگاهی از گرما و معادلات مربوطه در زندگی روزمره ما کاملاً عجین شده است به طوری که در تولید برق و

نیروگاه‌ها، ماشین‌های سواری و موتور کشتی‌ها در سطح وسیع استفاده می‌شود. در جهت مطالعه بر روی این شاخص‌ها و افزایش راندمان در این وسایل، می‌بایست از اصول اولیه ترمودینامیک و سیستم‌های مربوطه آشنایی کامل داشته باشیم.

### ۱-۱ تعاریف واژه‌های متداول ترمودینامیکی

همان‌طور که می‌دانیم عامل حرکت جامعه انرژی است و این انرژی از طرق مختلف قابل تأمین است. انرژی عضلانی دسترس‌پذیرترین و ارزان‌ترین انرژی در طبیعت بوده و بشر در تلاش است همواره جانشینی مناسب برای این نیرو بیابد.

در تعریف ترمودینامیک براساس انرژی می‌توان چنین بیان نمود که ترمودینامیک یعنی مطالعه انرژی و تبدیل آن به انواع دیگر انرژی به واسطه بالا بودن هزینه تولید انرژی می‌باشد بنابراین در جهت تبدیل و بهینه کردن انرژی می‌بایست اثرات آن را به صورت ذیل بررسی نمود.

- بررسی روش‌های تبدیل و اثرات محیطی

- توجه به بازده استفاده از انرژی

- راه‌های مصرف

دو شکل انرژی در ترمودینامیک به صورت بنیادی عبارت از حرارت و کار می‌باشد. در یک تعریف کلی، ترمودینامیک با حرارت و کار و آن گروه از خواص مواد که مرتبط با کار و حرارت است سروکار دارد. وابستگی به نیازهای اجتماعی (افزایش نیاز به انرژی برای تولید) از ضروریات توجه به علم ترمودینامیک می‌باشد. در یک نگاه کلی، انواع انرژی عبارتند از:

۱. حرارتی

۲. مکانیکی

۳. الکتریکی

۴. مغناطیسی

۵. شیمیایی

۶. هسته‌ای

۷. کوانتوم

با توجه به موارد بیان شده ترمودینامیک را می‌توان علم انرژی و تبدیل انرژی نامید به عبارتی دیگر علمی است که با حرارت و کار و آن گروه از خواص مواد که مرتبط با کار و حرارت هستند، سروکار دارد.

همانند تمام علوم، علم ترمودینامیک بر پایه مشاهدات تجربی بنا شده است و تمام یافته‌های تجربی در قالب قوانین بنیادی به صورت روابط ریاضی مشخص در آمده‌اند و این روابط شناخته شده موسوم به قوانین صفرم، اول، دوم، و سوم ترمودینامیک جهت تعیین محدودیت برای مقدار انرژی دسترس پذیر برای کار مفید و استفاده در آنالیزهای مهندسی می‌باشد.

#### ۱-۱-۱ نظریه ماکروسکوپیکی در ترمودینامیک

بر اساس دیدگاه ماکروسکوپیکی حالت‌های خاص از یک ماده در یک فاز معین که دارای فشار (P)، درجه حرارت (T)، و چگالی ( $\rho$ ) مشخصی باشد را حالت‌های مختلف یک ماده گویند. چگونگی رسیدن به آن نقطه مهم نیست، بلکه خود آن نقطه و مشخصات آن مهم است. و این حالت مستقل از مسیر می‌باشد.

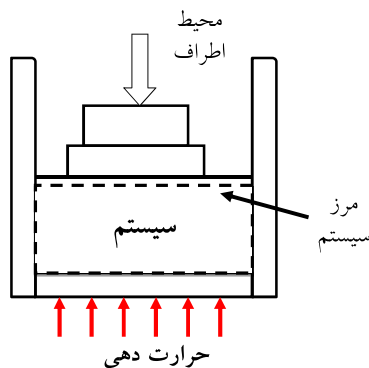
برای تشریح رفتار کامل در یک سیستم از دیدگاه ماکروسکوپیکی ما با جزئیات درونی یک ماده کاری نداریم و دیدگاه و بررسی ما مستقل از فرضیات ما در مورد ماهیت مواد است. از دید ماکروسکوپیکی ما همواره با حجم‌هایی سروکار داریم که در مقایسه با ابعاد مولکولی بسیار بزرگ هستند.

پایه‌های علم ترمودینامیک براساس مشاهدات تجربی بنا شده است و یافته‌ها در این مشاهدات تجربی به صورت قوانین بنیادی قابل استناد از قبیل قوانین اول، دوم، سوم ترمودینامیک به علاوه قانون صفرم که به صورت ساده و قابل ملموس تر تعریف شده، در آمده است.

#### ۱-۱-۲ سیستم ترمودینامیکی

سیستم ترمودینامیکی عبارت است از محدوده‌ای از فضا که حاوی مقداری ماده و یا حتی تهی می‌باشد و به وسیله مرز از محیط اطرافش جدا گردد و تحولات ترمودینامیکی در داخل آن مرز بررسی می‌گردد. مرز سیستم همان مسیر جدایش سیستم با محیط

اطرافش می‌باشد [شکل (۱-۱)]. حدود مرز در یک سیستم ترمودینامیکی قابل تغییر است. بنابراین برای تحلیل و آنالیز بهتر یک سیستم ترمودینامیکی می‌بایست از پارامترهایی از قبیل مرز سیستم، سطح کنترل، و حجم کنترل شناخت دقیق و کافی داشته باشیم. یک سیستم ترمودینامیکی به عنوان وسیله یا ترکیبی از وسایل است که شامل مقدار ماده مورد بررسی می‌باشد.



شکل ۱-۱. مثالی از یک مرز سیستم

در مجموع یک سیستم را در سه حالت می‌توان توصیف کرد:

- حجم کنترل که نمونه بارز آن کمپرسورها می‌باشند
- جریان جرم بسته که در مخازن با ورودی یک‌طرفه صدق می‌کند
- جریان انرژی که به صورت انتقال حرارت  $Q$  و کار  $W$  می‌باشد.

مرز یک سیستم به دو صورت است مرز متحرک و مرز ثابت. در سیستم مرز متحرک، با افزایش درجه حرارت و انتقال آن به گاز داخل مخزن، حجم گاز افزایش یافته و منجر به افزایش فشار داخل مخزن می‌شود. این افزایش فشار منجر به بالا رفتن پیستون می‌شود در نتیجه مرز سیستمی که جرم آن تحت کنترل است دائماً در حال تغییر است. کار و حرارت ( $Q, W$ ) به عنوان جریان انرژی می‌تواند از مرز سیستم عبور کند ولی مقدار ماده درون سیستم ثابت باقی می‌ماند.

### ۳-۱-۱ سیستم مرز بسته

سیستمی که هیچ تبادل جرمی ( $m$ ) با محیط اطراف ندارد و جرم ماده در این سیستم تحت کنترل می‌باشد. به عبارتی در این سیستم هیچ جرمی عبور نمی‌کند ولی امکان عبور انرژی هست. در سیستم بسته (جرم ثابت) قوانین اول و دوم برای جرم کنترل است و با این قوانین می‌توان حجم کنترل را نیز تحلیل نمود.

### ۴-۱-۱ سیستم مرز باز

سیستم مرز باز به سیستمی گویند که با محیط اطرافش تبادل جرم داشته باشد ولی حجم سیستم ثابت است. جرم از مجاری خاص وارد سیستم شده و از مجاری دیگر می‌تواند خارج شود. بنابراین به این سیستم حجم کنترل هم گویند.

### ۵-۱-۱ سیستم ایزوله (عایق حرارتی)

در این سیستم، تبادل انرژی از طریق انتقال حرارت غیرممکن است و ورود و خروج انرژی از طریق انتقال حرارت وجود ندارد. یک سیستم ایزوله حرارتی می‌تواند به صورت سیستم باز هم باشد. در سیستم عایق معمولاً مجموعه سیستم تحت تأثیر محیط نیست و به عبارتی کار و حرارت از مرز آن عبور نمی‌کند.

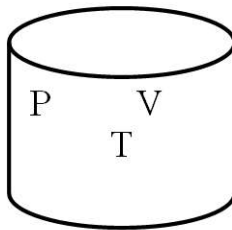
### ۶-۱-۱ حالت ترمودینامیکی

هر سیستم ترمودینامیکی دارای پارامترهای مشخصی مانند دما ( $T$ )، فشار ( $P$ )، و حجم ( $V$ ) می‌باشد که برای همان ماده در همان وضعیت مشخص تعریف می‌شود. در یک حالت مشخص تمام خواص سیستم دارای مقداری ثابتند. چنین وضعیت مشخص برای یک ماده در داخل یک سیستم را حالت ترمودینامیکی آن سیستم گویند.

### ۷-۱-۱ تعادل ترمودینامیکی

اگر مقدار یک خاصیت سیستم تغییر کند، حالت جدید و متفاوتی ایجاد خواهد شد. وضعیت تثبیت شده یک حالت ( $T, P, V$ ) را تعادل ترمودینامیکی آن گویند. ترمودینامیک با حالت تعادل سروکار دارد و در این حالت پتانسیل‌های نامتعادل در

درون سیستم وجود ندارد. سیستمی که در حالت تعادل است چنانچه از محیط خود منزوی (ایزوله) و جدا شده باشد، هیچ تغییری نخواهد کرد.



شکل ۱-۲. حالت ترمودینامیکی در یک سیستم

#### ۱-۱-۸ فرآیند (تحول) ترمودینامیکی

معمولاً با تغییر اندکی در هر یک از پارامترهای فشار، دما، و حجم مابقی حالات نیز تغییر می‌کنند. اگر حالت ترمودینامیکی یک سیستم تغییر کند، تحول در آن سیستم صورت می‌گیرد که به آن تحول ترمودینامیکی گویند. به عبارتی دیگر هر گونه تغییری که یک سیستم را از حالت تعادل به حالت دیگر انتقال دهد را فرآیند می‌نامند. این تحول ترمودینامیکی می‌تواند با حفظ تعادل سیستم باشد که در این حالت مسیر تحول مشخص است. تحول هر سیستم در تعادل انجام نمی‌شود. همیشه شرط انجام یک فرآیند عدم تعادل در سیستم می‌باشد. مخزن گازی را در نظر بگیریم که فشار داخل آن با قرارگیری وزنه بر روی آن در حد مشخصی ثابت باقی مانده است. اگر وزنه را از روی این مخزن گاز برداریم فشار سیستم کاهش یافته و در نتیجه آن وزنه بسمت بالا حرکت نموده و حجم سیستم افزایش می‌یابد. وقتی یک یا چند خاصیت سیستم تغییر کند، تغییر حالت رخ می‌دهد که به آن فرآیند گویند. به عبارتی دیگر، مسیری از حالات متوالی که سیستم از آن می‌گذرد را فرآیند گویند مثل برداشتن وزنه که سبب ایجاد عدم تعادل مکانیکی در سیستم شده و منجر به بالا رفتن پیستون می‌شود این حالت تا ایجاد تعادل مکانیکی در سیستم ادامه پیدا می‌کند.

فرآیند ایده‌آل (شبه تعادلی) به فرآیندی که انحراف از حالت تعادل ترمودینامیکی در آن بسیار کوچک (بی‌نهایت کوچک) است. و این حالت‌ها را می‌توان تعادلی فرض

کرد. فرایندها را می‌توان به صورت هم دما، هم فشار، و هم حجم تعریف نمود در طی هر فرآیند یک خاصیت ماده در طی فرآیند ثابت می‌ماند. در فرآیند هم دما، دمای سیستم ثابت است و در فرآیند هم حجم، فرآیند در یک حجم مشخص و ثابت انجام می‌گیرد.

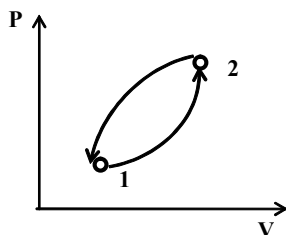
در یک فرآیند ترمودینامیکی دو مورد باید مورد توجه قرار گیرد.

- تشخیص نقطه شروع و انتهای فرآیند در دیاگرام

- تشخیص مسیر فرآیند در دیاگرام

### ۹-۱-۱ سیکل در فرایندهای ترمودینامیکی

معمولاً دو سیکل در فرایندهای ترمودینامیکی تعریف می‌شود که عبارتند از سیکل ترمودینامیکی و سیکل مکانیکی.



شکل ۱-۳. مسیر یک سیکل ترمودینامیکی

سیکل ترمودینامیکی به حالتی که بعد از طی فرآیند کامل به حالت اولیه برگردد و تمام خواص آغازین ماده را داشته باشد گفته می‌شود. در یک سیکل نیروگاه، آب تبدیل به بخار شده و با گردش در سیکل و تولید قدرت دوباره به صورت آب یعنی همان ماده اولیه در می‌آید.

سیکل مکانیکی برعکس سیکل ترمودینامیکی است و فرآیند نهایی ماده با آغازین آن متفاوت است. در یک موتور چهار زمانه با چهار سیکل، که در هر دوران یک سیکل انجام می‌شود و در آن هوا و سوخت می‌سوزند و تبدیل به محصولات احتراق شده و به اتمسفر برمی‌گردد.



## ۱-۱-۱۰ خواص و حالت یک ماده

جرم معینی از یک ماده دارای اشکال مختلفی می‌باشد که به آن فاز گویند. فاز معمولاً کمیتی همگن از یک ماده با فشار و درجه حرارت معین تعریف می‌شود. مثل آب که در یک جرم مشخص ممکن است به حالت‌های جامد، مایع و گاز وجود داشته باشد. اصولاً فازهای یک ماده با مرز از هم جدا می‌شوند.

مواد را در ترمودینامیک از نظر خواص به دو بخش تقسیم می‌کنند

**خواص شدتی:** به خواصی همانند فشار، درجه حرارت، و چگالی ماده که

مستقل از جرم ماده باشد را شدتی گویند.

**خواص مقداری:** به خواصی مانند وزن، حجم کل ... که رابطه مستقیم با جرم

داشته باشد را خواص مقداری گویند به عبارتی اگر ما مقداری از یک ماده را نصف کنیم خواص مقداری آن ماده نصف حالت اولیه می‌شود ولی هر بخش دارای خواص شدتی است که برابر با خواص شدتی ماده اولیه قبل از نصف کردن است.

## ۱-۲ دما و معیارهای دمایی در ترمودینامیک

همان‌طور که می‌دانیم حس لامسه وسیله خوبی برای تشخیص گرمی و سردی اجسام نیست و از طرفی حس لامسه در بعضی مناطق قابل استفاده نیست و همچنین در بعضی مناطق حساسیت کافی را ندارد. دما از احساس سردی و گرمی سرچشمه می‌گیرد بدین معنی که وقتی اشیاء مختلف را احساس می‌کنیم که به گرمی و سردی تعبیر می‌شود و به اصطلاح می‌گوییم دمای جسمی بالاتر از دمای جسم دیگر است یا دمای یک جسم با دمای جسم دیگر مساوی است. این یک تعریف مقدماتی از دما می‌باشد. در تعریف اولیه از دما می‌توان آن را به عنوان شاخصی از انرژی مولکول‌های یک ماده قلمداد نمود. هرچه دمای جسمی بالاتر باشد، ذرات جسم دارای انرژی، ارتعاش و جنبش بیشتری هستند. اگر دمای جسمی طی فرآیندی تغییر نکند این می‌تواند بدین معنی باشد که میزان خالص انرژی دریافتی توسط جسم صفر است.

$$T = \text{cte} \rightarrow Q = 0$$

این حالت را می‌توان براساس قوانین ترمودینامیک که در فصول بعد اشاره

خواهد شد بحث کرد. برای تعریف دقیق و فیزیکی دما باید توجه داشت که هیچگاه با یک ذره تنها و منفرد سروکار نداریم بلکه موضوع دما با موضوع تعادل دمایی کاملاً مرتبط می‌باشد.

### ۱-۲-۱ تعادل دمایی

وقتی دو جسم گرم و سرد در مجاورت همدیگر قرار می‌گیرد، جسم گرم سردتر و جسم سرد گرم‌تر می‌شود. بررسی دقیق‌تر نشان داد که وقتی جسمی گرم می‌شود در آن انبساط رخ می‌دهد و در حالت سرد شدن منقبض می‌شود. درحالی‌که دو جسم با هم تماس دمایی دارند پس از مدتی تغییرات حجم در این دو وضعیت جسمی متوقف می‌شود به عبارتی اگر تغییری در دو جسم در تماس حرارتی مشاهده نشود. در این صورت می‌توان گفت که آن دو جسم حرارتی مساوی دارند و یا تعادل دمایی به وجود آمده است.

تجربه نشان می‌دهد که اگر دو جسم با جسم سومی در حال تعادل دمایی باشد. آن دو جسم در حال تعادل دمایی با هم هستند. این قانون اساس اندازه‌گیری درجه حرارت است و به قانون صفرم ترمودینامیک معروف گردید و به شکل زیر بیان گردید.

وقتی دو جسم مدت زیادی با هم در تماس باشد بین آن‌ها تعادل دمایی ایجاد می‌شود و در این حالت جسم A را به دماسنج نزدیک می‌کنیم و همچنین جسم B را نیز به دماسنج نزدیک می‌کنیم هر دو یک دما را نشان دهد دو جسم A و B با هم در تعادل دمایی هستند.

در مسائل مختلف ترمودینامیک از معیارها و شاخص‌های مختلف دمایی استفاده می‌کنیم که مهم‌ترین این شاخص‌ها که جنبه کاربری بیشتری دارند عبارتند از شاخص سلسیوس، کلونین، و فارنهایت.

### ۱-۲-۲ معیار سلسیوس ( $^{\circ}\text{C}$ )

در این معیار جهت تعیین دو مبنای ابتدایی و انتهایی مشخص، نقطه ذوب یخ در فشار اتمسفر صفر و نقطه جوش آب را در ۱۰۰ درجه لحاظ می‌کنیم و این فاصله ابتدایی و

انتهایی را به نسبت مساوی به یک صد قسمت تقسیم گردید. در این دما نقطه سه گانه آب ۰/۰۱ درجه سلسیوس است.

### ۱-۲-۳ معیار کلوین (K)

در معیار کلوین نقطه پایه زیرین یا همان صفر، به نقطه‌ای اطلاق می‌شود که انرژی درونی ماده صفر باشد و ذرات هیچ جنبشی نداشته باشند به عبارتی انرژی درونی مولکول‌های یک گاز به پایین‌ترین مقدار خود می‌رسد. صفر کلوین پایین‌ترین دمای ممکن با معنا است و کمتر از آن مفهوم خاص ندارد. برای کاربردی کردن این معیار در مسائل ترمودینامیکی، درجه حرارت پایه اولیه را همان نقطه ذوب یخ به حساب می‌آوریم که حدود ۲۷۳/۱۵ درجه کلوین می‌باشد و نقطه فوقانی همان نقطه جوش آب است که حدود ۳۷۳/۱۵ درجه کلوین می‌باشد و همانند درجه سلسیوس به یک‌صد قسمت مساوی تقسیم شده است. درجه حرارت‌های فوق در فشار ۷۶ mm-Hg یا یک اتمسفر سنجش گردید.

### ۱-۲-۴ معیار فارنهایت (F)

این معیار که در سیستم انگلیسی در فشار اتمسفر تعریف گردید، نقطه انجماد آب برابر است با ۳۲ درجه و نقطه جوش آب ۲۱۲ درجه می‌باشد و فاصله بین دو دما به‌طور مساوی به ۱۸۰ قسمت شده است. درجه حرارت بدن در این معیار دمایی ۹۸/۶ انتخاب گردید.

### ۱-۲-۵ تبدیل واحدهای دمایی

برای تحلیل بهتر و دستیابی به روش مناسب‌تر برای حل مسائل ترمودینامیک نیاز است که معیارهای دمایی شرح داده شده را به یکدیگر تبدیل نمود. بنابراین براساس نقطه‌ای مشخص برای هر معیار و اختلاف میان دو نقطه این تبدیل انجام می‌شود. فرمول کلی برای این تبدیل واحدها عبارتست از:

$$\frac{x - x_0}{\Delta x} = \frac{y - y_0}{\Delta y} \quad (1-1)$$